



Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 51/2021

# Datafuusiomenetelmän käyttö kalankasvattamoiden vedenlaatuvaikutusten seurannassa Saaristomerellä

Olli Malve, Kari Kallio, Eero Siivola, Mikko Kervinen,  
Markus Kankainen ja Vesa Keto

# **Datafuusiomenetelmän käyttö kalankasvattamoiden vedenlaatuvaikutusten seurannassa Saaristomerellä**

Olli Malve, Kari Kallio, Eero Siivola, Mikko Kervinen,  
Markus Kankainen ja Vesa Keto



Hanke on osittain rahoitettu Euroopan meri- ja kalatalousrahastosta.

### **Viittausohje:**

Malve, O., Kallio, K., Siivola, E., Kervinen, M., Kankainen, M. & Keto, V. 2021 Datafuusio-menetelmän käyttö kalankasvattamoiden vedenlaatuvaikutusten seurannassa Saaristomerellä. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 51/2021. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 19 s.



ISBN 978-952-380-244-5 (Painettu)

ISBN 978-952-380-245-2 (Verkkajulkaisu)

ISSN 2342-7647 (Painettu)

ISSN 2342-7639 (Verkkajulkaisu)

URN <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-380-245-2>

Copyright: Luonnonvarakeskus (Luke)

Kirjoittajat: Olli Malve, Kari Kallio, Eero Siivola, Mikko Kervinen, Markus Kankainen ja Vesa Keto

Julkaisija ja kustantaja: Luonnonvarakeskus (Luke), Helsinki 2021

Julkaisuvuosi: 2021

Kannen kuva: Markus Kankainen

Painopaikka ja julkaisumyynti: PunaMusta Oy, <http://luke.juvenesprint.fi>

## Tiivistelmä

Olli Malve<sup>1)</sup>, Kari Kallio<sup>1)</sup>, Eero Siivola<sup>1)</sup>, Mikko Kervinen<sup>1)</sup>, Markus Kankainen<sup>2)</sup> ja Vesa Keto<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Suomen ympäristökeskus (SYKE), Latokartanonkaari 11, 00790 Helsinki

<sup>2)</sup> Luonnonvarakeskus (Luke), Itäinen Pitkäkatu 4 A, 20520 Turku

Kalankasvatuksen kestävä kehittäminen kannalta on olennaista tietää, kuinka paljon kalankasvattamo tai muu toiminta kuormittaa ympäristöä ja vaikuttaa vesien ekologiseen tilaan. Tässä työssä Saaristomeren kasvattamoiden vaikutuksia veden  $\alpha$ -klorofylli-pitoisuuteen tarkasteltiin velvoitetarkkailuun liittyvän näytteenoton, SYKEN satelliittikuvatulkintojen sekä vuonna 2019 toteutettujen intensiivimittausten avulla. Eri menetelmillä tuotettu mittaustieto yhdistettiin SYKEN datafuusio-järjestelmällä. Yhdistämisen tuloksena saatiin vuoden 2019 ja 2020 kasvukauden päivittäiset  $\alpha$ -klorofylli-pitoisuuden karttakuvat ja aikasarjat laitosten ympäristöistä ja koko Saaristomeren alueelta. Neljän kasvattamon vaikutuksia tarkasteltiin tarkemmin. Niillä ei ollut datafuusio-menetelmän tarkkuuden rajoissa havaittavia vaikutuksia  $\alpha$ -klorofyllin pitoisuuteen. Erialaisten mittausten yhdistäminen paransi vaikutusarvioiden alueellista ja ajallista kattavuutta ja luotettavuutta. Jotta mahdolliset vähäiset vaikutukset saadaan havaittua avomerelläkin, datafuusiota tulee edelleen kehittää ja yhdistää virtaus-vedenlaatumalleihin. Merkittäviä parannuksia voidaan saada myös anturimittausten ja satelliittitulkintojen tarkkuutta parantamalla.

**Asiasanat:** Kalankasvatus, vesistövaikutukset,  $\alpha$ -klorofylli, datafuusio

# Sisällys

<b>1. Johdanto .....</b>	<b>5</b>
<b>2. Kalankasvatuksen vaikutusten seuranta Saaristomerellä .....</b>	<b>7</b>
<b>3. Datafuusio-järjestelmä .....</b>	<b>9</b>
<b>4. A-klorofyllin alueellinen ja ajallinen vaihtelu laitosten ympäristössä.....</b>	<b>10</b>
4.1. Aikasarjat ja pitoisuuskartat .....	10
4.2. Keskiarvotarkastelut.....	13
<b>5. Yhteenveto ja johtopäätökset .....</b>	<b>16</b>
<b>Viitteet.....</b>	<b>18</b>



# 1. Johdanto

Valtioneuvoston vuoden 2014 vesiviljelystrategian tavoitteena on kasvattaa manner-Suomen kalanviljelyn määrää nykyisestä 9 miljoonasta kilosta 20 miljoonaan kiloon vuoteen 2022 mennessä. Samanaikaisesti pyritään edistämään kotimaisen kalan käyttöä ja ehkäisemään kalanviljelyn ympäristöhaittoja osana valuma-alueen kokonaiskuormituksen hallintaa. Tavoitteena on saavuttaa rannikkovesimuodostumien ja Itämeren hyvä tila.

Kalankasvatuksen ravinnekuormitus onkin vähentynyt merkittävästi 1990-luvulta lähtien tuotantomenetelmien ja rehujen kehityksen ansiosta. Nykyisin kalankasvattamot pyritään sijoittamaan YM:n ja MMM:n sijainninhajaus- ja merialuesuunnitelman mukaisesti ulkosaaristoon, jossa ravinnekuormitus laimenee tehokkaasti ja vesistövaikutukset ovat entistä pienemmät. Samanaikaisesti kehitetään kalankasvattamoiden uusia tuotantoteknologioita kuten suljettua kiertoa ja valuma-alueella mm. peltojen kipsikäsittelyä, jotka parantavat vesiekosysteemien suojelun tasoa.

Lupaavista kasvumahdollisuuksista ja kuormituksen pienenemisestä huolimatta kalanviljelyn kestävä kasvua rajoittaa edelleen rannikkoalueiden rehevöityminen. Tilanne muuttui haasteellisemmaksi EU:n Weser-tuomion ja varovaisuusperiaatteen tiukentuneen tulkinnan vuoksi. Vanhoja verkkoallaskasvatuksen ympäristölupia on kiristetty, eivätkä yritykset ole epäselvässä tilanteessa lähteneet raskaisiin lupaprosesseihin hakemaan uusia lupia. Tämän vuoksi vesien tilan seurannalta ja hoidolta edellytetään entistä suurempaa tarkkuutta sekä epävarmuuksien ja riskien tehokasta hallintaa (Paloniitty ym. 2017). Ympäristöviranomaisen lupapäätöksenteon kannalta on olennaista tietää, paljonko kasvatuslaitos kuormittaa ympäristöä ja minkälaisia vaikutuksia kuormituksella on.

Kasvattamoiden velvoitetarkkailussa vaikutuksia on seurattu jo pitkään. Suominen ja Helminen (2003) tutkivat Kustavin alueen kalankasvatuksen aiheuttaman ravinnekuormituksen leviämistä kohdennetun matemaattisen virtaus- ja kulkeutumismallin avulla. Mallitarkastelun perusteella Kustavin kalankasvatuksen kuormitus suuntautuu useammin rannikkoa pitkin pohjoiseen Uudenkaupungin suuntaan kuin etelään. Läheisen Mynälahden pohjukkaan laskevien jokien vaikutus on kalankasvatusta merkittävämpi pintavesien ravinnepitoisuuksia lisäävä tekijä Kustavin eteläpuolisilla merialueilla, mutta Kustavin länsi- ja pohjoispuolella kalankasvatuksen vaikutus on ko. jokien kuormitusta voimakkaampaa. Kustavin Ströömin salmen pintavesien ravinnepitoisuuksien muutokset johtuvat lähes yksinomaan kalankasvatuksesta. Kettunen ym. (2015) mallinsi Loukeenkarin kasvattamon vaikutuksia Kihdin pohjoispään ravinnepitoisuuksiin. Vaikutukset olivat alle vesianalyysien havaintotarkkuuden. Suominen ym. (2021) on mallintanut Suomen rannikkoalueille sijoitettavien laitosten vaikutuksia *a*-klorofylliin. Työssä muodostettiin menetelmä sellaisten alueiden rajaamiseksi, joille sijoitettu kuormitus ei aiheuttaisi pitoisuusmuutoksia suojelukohteissa. Työ tehtiin kahdessa osassa, joista ensimmäinen sisälsi tuhansia FICOS-rannikkomalliajoa ja toinen malliajojen tulostiedostojen jälkikäsittelyn ja visualisoimisen. Kotamäki ym. (2021) on tutkinut tilastollisesti Ahvenanmaan kasvattamoiden vaikutuksia päälysläyvästään ja pohjaeläimiin. Tulosten perusteella vaikutukset riippuvat mm. tuotannon määrästä, merialueen avoimuudesta ja pohjan laadusta, mutta rajoittuvat kasvattamon välittömään läheisyyteen.

Tässä raportissa esitämme, kuinka eri menetelmillä tuotettu vedenlaatutieto yhdistetään SYKEN datafuusio-järjestelmällä ja tarkastelemme *a*-klorofyllin vaihtelua muutamalla Saaristomeren kalankasvatuslaitosta ympäröivällä vesialueella. Keskeisiä tuloksia on aikaisemmin esitetty Malve ym. (2021):n julkaisussa.

Aikaisemmin Kettunen ym. (2015) ovat käyttäneet erilaisia mittauksia ja menetelmiä kalankasvatuksen vedenlaatuvaikutusten arvioinnissa (taulukko 1). Suurimmat erot meidän tutkimukseemme nähden ovat  $\alpha$ -klorofyllin satelliittikuvatuotteet, EXO-sondi- ja poijumittaukset sekä datafuusion käyttö, joita ei Kettusen ym. (2015) tutkimuksessa ollut mukana. Kettusen ym. (2015) tutkimuksessa käytettiin myös rannikkomallia ravinnepitoisuuksien tarkasteluun. Mallissa on nykyisin mukana ravinteiden lisäksi  $\alpha$ -klorofyllin laskenta, mutta sen käyttöä kalankasvatustarkasteluihin rajoittaa noin 400 m:n hilakoko.

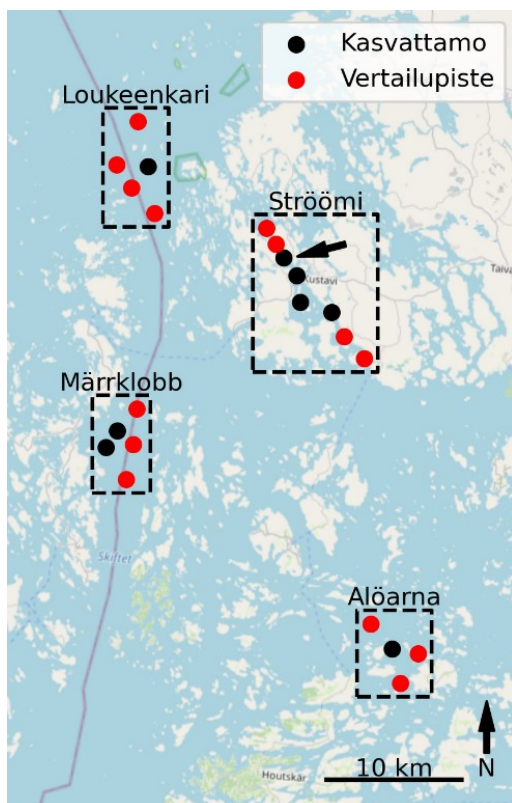
**Taulukko 1.** Aineistoja ja menetelmiä, joita on käytetty tai voidaan käyttää tutkittaessa kalankasvatuksen vaikutuksia vedenlaatuun. Taulukossa on myös vertailu tätä tutkimusta ja Kettunen ym. (2015):n tutkimusta.

Aineisto tai menetelmä	Kettunen ym. (2015)	Tämä tutkimus
Aineistot		
Pitkäaikainen vertailudata	Kyllä	Ei
Velvoitetarkkailumittaukset	Kyllä	Kyllä
Lisämittaukset	Vesinäytteitä	Vesinäytteitä, EXO, poiju
Satelliittikuvat	Pintaleväkukinnat (Landsat 8)	$\alpha$ -klorofylli (Sentinel-2)
Data-analyysit		
Vertailuasema-analyysit	Kyllä	Ei
Varianssikomponenttianalyysit	Kyllä	Ei
Alueelliset keskiarvot (satelliitti)	Ei	Seurantavyöhykkeittäin
Aineistojen yhdistäminen		
Datafuusio	Ei	Kyllä
Virtaus- ja vedenlaatumalli		
Rannikkomalli	Virtaukset ja ravinteet	Ei
Rannikkomallin ja mittausten yhdistäminen		
Data-assimilaatio	Ei	Ei

$\alpha$ -klorofylli on eräs keskeisistä ekologisen tilan muuttujista, johon kalankasvatus ravinnepäästöjen kautta oletettavasti vaikuttaa. Satelliittikaukokartoituksen (Koponen & Attila 2017) perusteella saimme ensi kertaa koko Saaristomeren kattavan arvion  $\alpha$ -klorofyllin vaihtelusta alle sadan metrin alueellisella erotuskyvyllä. Tarkensimme sitä laitosten ympärillä tehdyillä anturimittauksilla ja vesinäytteillä (Niukko & Kankainen 2021). Eri menetelmillä tuotetun mittaustiedon yhdistäminen datafuusiolla parantaa merkittävästi tiedon alueellista ja ajallista kattavuutta ja tiedon luotettavuutta (Laine ym. 2017, Liljaniemi & Kettunen 2019, Malve ym. 2021).

## 2. Kalankasvatuksen vaikutusten seuranta Saaristomerellä

Saaristomeren alueelta valitsimme neljä kalankasvatusaluetta tarkempaan seurantaan: Märklobbenin kasvattamot Kihdin keskivaiheilla, Loukeenkari Kihdin pohjoispäässä, Kustavin Ströomin keskiosan kasvattamot ja Alöarna Houtskärin pohjoispuolella (kuva 1). Märklobbenin kasvattamot ovat tuotantomäärältään (yhteensä n. 1 000 000 kg/v) Suomen suurimpia, Loukeenkarin (n. 300 000 kg/v) ja Alöarnan (n. 300 000 kg/v) kasvattamot ovat keskikokoisia ja Ströomin kasvattamot ovat pieniä (n. 50 000 kg/v).



**Kuva 1.** Märklobbenin, Loukeenkarin, Ströomin ja Alöarnan laitosten ja tässä tutkimuksessa käytettyjen vertailupisteiden sijainnit Saaristomeren alueella. Hupaniityn kalankasvattamon sijainti Ströomissä on osoitettu nuolella. Pohjakartta © OpenStreetMap.

Velvoitetarkkailussa kalankasvatuksen vaikutusta veden laatuun seurataan ottamalla vesinäytteitä tyypillisesti 1–4 pisteellä, 1–2 kertaa kesässä. Välillä tehdään myös alueellisesti kattavampaa seuranta. Esimerkiksi Kustavi-Iniö-alueelta otettiin vesinäytteitä vuoden 2018 kesä- ja heinäkuussa 41 asemalta (Turkki 2020). Saaristomerellä on myös ympäristöhallinnon intensiiviasemat Seilissä, Brändössä ja Utössä, joilta otetaan näytteitä noin kaksi kertaa kuukaudessa. Lisäksi Saaristomerellä on tehty kaksi kertaa vedenlaadun transekti-mittauksia veneeseen asennetulla läpivirtauslaitteistolla kalankasvattamoiden kohdalla ja niiden lähialueilla (Turkki 2019, Turkki 2020).

Vuonna 2019, kalankasvatusyritykset mittasivat Luken koordinoimana (Niukko & Kankainen 2021) kerran viikossa *a*-klorofyllipitoisuutta ja sameutta käsikäyttöisellä EXO-sondilla Loukeenkarin, Hupaniityn ja Alöarnan kasvattamoilla (Kuva 1) kasvattamon vierestä sekä vaihtelevasti 100, 400 ja 800 m etäisyydellä laitoksista. Loukeenkari ja Alöarnassa oli käytössä myös



mittauspoiju (EHP Ympäristöpoiju), jolla mitattiin  $\alpha$ -klorofylliä ja sameutta tunnin välein. Poijujen antureissa oli likaantumisongelmia ja luotettavia mittauksia saatiin vain noin viikon ajalta. Mittaukset kalibroitiin 2–3 kontrollivesinäytteen avulla. Sentinel-2 kuviin perustuvat tarkan resoluution  $\alpha$ -klorofyllin tuotteet olivat nyt ensimmäistä kertaa käytössä kalankasvattamoiden vesistövaikutusten seurannassa. Tämä mahdollisti laaja-alaisten vaikutusten havaitsemisen vesimuodostumatasolla. Sentinel-2 kuvien alueellinen erottelukyky on 10–20 m, mutta  $\alpha$ -klorofyllituotteet tehtiin 60 m:n erottelukyvällä.

Tässä työssä käytettiin kahdella tavalla tulkittuja  $\alpha$ -klorofyllituotteita. Case2Extreme (C2X, <https://www.brockmann-consult.de>)-prosessorilla tuotetut  $\alpha$ -klorofyllit ovat osa SYKEN satelliittikuvatuotantoa, ja niitä käytetään vesimuodostumakohtaisten pitoisuusstatistiikkojen laskennassa Suomen rannikolla. Näistä tuotteista laskettiin  $\alpha$ -klorofyllistatistiikat kasvattamoiden lähistöllä. Datafuusiossa käytettiin Polymer (<https://www.hygeos.com/polymer>, versio 4.11) prosessorilla tuotettuja  $\alpha$ -klorofyllikuvia, joissa on vähemmän kohinaa kuin C2X:n tapauksessa. Satelliittituotteista on poistettu sekä rantojen läheiset, että vaikeasti tulkittavien matalien vesialueiden havainnot.

### 3. Datafuusio-järjestelmä

Mittauksia ympäristön tilasta on saatavilla monista lähteistä. Tällöin oleellista on niiden informaation yhdistäminen optimaalisella tavalla. Fuusioitava data on usein epäsäännöllistä, siinä on puuttuvia tietoja ja edustavuudeltaan hyvin erityyppisiä havaintoaineistoja. Esimerkiksi satelliittihavainnot saadaan vain pilvettömiltä alueilta. Vesinäytteistä tehdyt vesianalyysit puolestaan kuvaavat vedenlaatua tarkasti mittauspaikalla ja mittaushetkellä. Näitä asemanäytteitä on kuitenkin harvakseltaan, tyypillisesti muutamia kertoja kesässä. Kun mittauksien lisäksi niihin liittyvät epävarmuudet tunnetaan, tuottaa datafuusio parhaan arvion vedenlaadusta.

Datafuusiolaskenta perustuu Kalman-suodatin ja -tasoin algoritmeihin sekä niiden erilaisiin yleistyksiin (Laine ym. 2017, Kauranne ym. 2019) ja se vaatii tietoa tarkasteltavan ilmiön luonnollisesta ajallisesta ja paikallisesta vaihtelusta. Kriging-interpolaatio on samaan käyttötarkoitukseen luotu menetelmä spatiaalisessa tilastotieteessä. Tulokset mukailevat havaintoja silloin, kuin niitä on saatavilla. Menetelmä interpoloi puuttuvat arvot ajassa ja paikassa annettujen korrelaatioparametrien mukaisesti ja arvion epävarmuus kasvaa, mitä kauemmaksi mennään tunnetuista havainnoista.

Datafuusio-järjestelmä on kehitetty SYKE:n ja Arbonaut Oy:n yhteistyönä (Malve ym. 2018, Kauranne ym. 2019). Järjestelmä tuottaa vesien ja merenhoidon käyttöön alueellisen ja reaaliaikaisen tiedon vesien tilasta ja luokituksesta. Järjestelmä yhdistää eri lähteistä saatavaa pintavesien ympäristötietoa (esim. *a*-klorofylli tai sameus) perinteisistä seurannoista, automaattisilta mittausasemilta sekä satelliiteista. Järjestelmässä on karttapohjainen QGIS- käyttöliittymä datan käsittelyyn ja visualisointiin. Järjestelmän ohjelmistot ovat SYKE:n palvelimella, ja SYKE toimii niiden ylläpitäjänä.

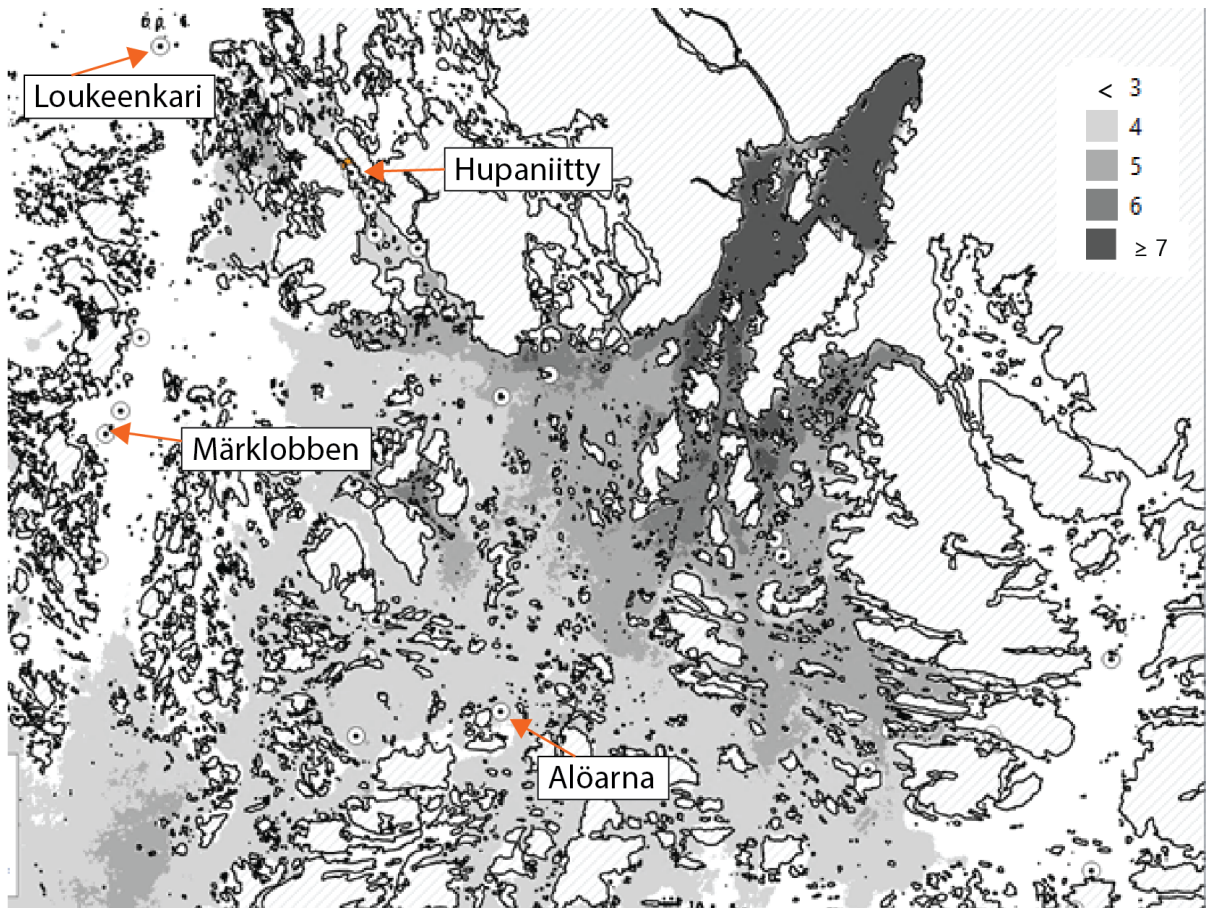
Tässä työssä meri- ja rannikkoalueen *a*-klorofylli-pitoisuus valittiin fuusioitavaksi tilamuuttujaksi ja kuvauksen ajallinen mittakaava on yksi vuorokausi alueellisessa mallihilassa, jonka yksittäisen hila-alkion koko oli 60 x 60 m. Laskenta rajattiin avovesiajalle. Tuloksena saatiin paras mittauksiin perustuva informaatio jokaiselle merialueen laskentahilan alkion jokaisena avovesikauden päivänä.


## 4. A-klorofyllin alueellinen ja ajallinen vaihtelu laitosten ympäristössä

Käytetyssä datafuusiomenetelmässä laskentaan voidaan vaikuttaa neljällä malliparametrilla. Suurin vaikutus on korrelaatioetäisyydellä, joka kertoo, kuinka suuren alueen mittaukset vaikuttavat kunkin yksittäisen hila-alkion fuusioituihin tuloksiin. A-klorofyllin variogrammi-tarkastelun perusteella korrelaatiopituus vaihteli 1 km:stä 10 km:iin. Tässä artikkelissa esitetyt tulokset on tehty olettaen vaikutuskentäksi 0,5 km, jolloin pienemmän mittakaavan erot eivät keskiarvoistu liikaa. Seuraavaksi suurin vaikutus on parametrilla, joka määrittää mittausten ajallisen vaikutuksen pituuden. Hiukan samoin kuin variogrammi-analyysissä, parametrin arvon saa selville arvioimalla yksittäisen karttapisteen mittausten ajallista muutosta niin kutsutussa autokorrelaatioanalyysissä, jolla voi havaita ajallisen vaikutuksen olevan noin kolme päivää. Näiden kahden parametrin lisäksi malliin määritellään mallivirhe, eli mallin maksimaalinen virhe, ja mallikeskiarvo, eli arvo, johon malli ajautuu, kun mittauksia ei ole tehty joko ajallisesti tai fyysisesti läheltä. Nämä molemmat arvot saadaan tutkimalla koko tarkasteluajan mittausten keskiarvoa ja vaihtelua. Malliparametrien lisäksi jokaiselle mittauslähteelle tulee määrittää tarkkuus. Vesinäytteisiin pohjautuvien mittausten laboratorioissa määritetty suhteellinen virhe (66 %:n luotamusväli) oli noin  $\pm 10$  %. Muille mittauksille arvioidut virheet olivat: EXO-sondin  $\alpha$ -klorofyllianturi 30 %, poijun  $\alpha$ -klorofyllianturi 40 % ja satelliittituote  $\pm 60$  %.

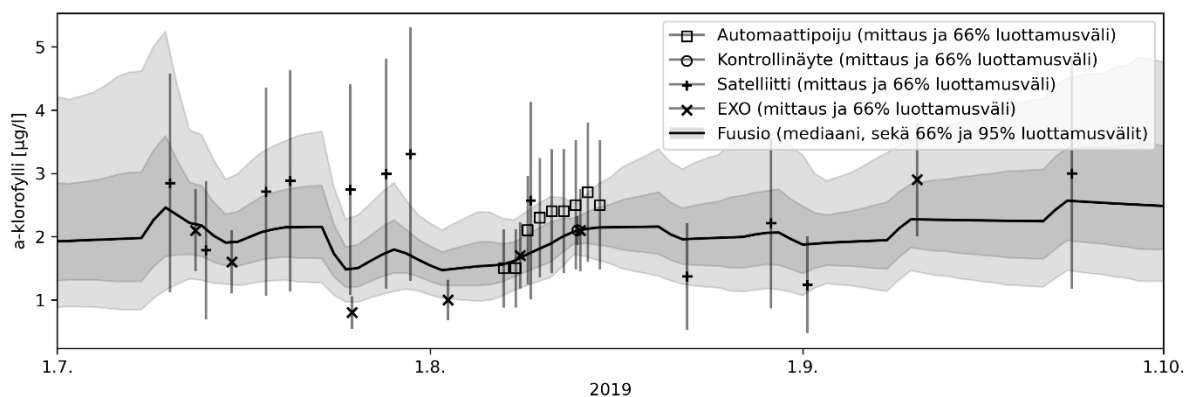
### 4.1. Aikasarjat ja pitoisuuskartat

Satelliittikuvatuotteiden ja *in situ* -mittausten yhdistämisen jälkeen laskimme datafuusiolla  $\alpha$ -klorofyllipitoisuuden ja sen keskihajonnan päivittäin tarkastelualueen jokaiselle 60 m:n hila-alkiolle. Vuonna 2019, datafuusiossa oli *in situ*-mittausten osalta mukana EXO- ja poijumittaukset sekä vesinäytetulokset, mutta vuonna 2020 vain vesinäytetulokset.



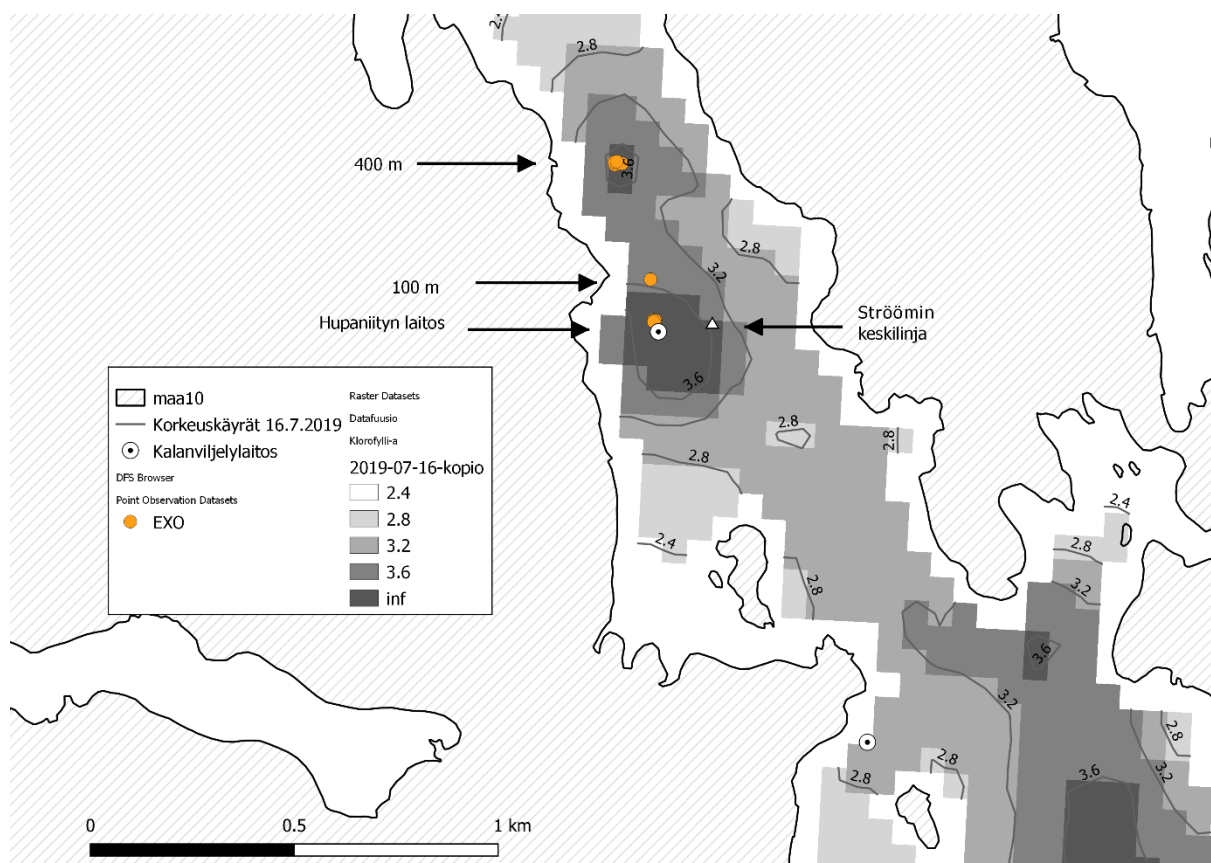
**Kuva 2.** Saaristomeren fuusioitu  $\alpha$ -klorofyllipitoisuus ( $\mu\text{g/l}$ ) 16.7.2019 (koko tarkastelualue) sekä tässä tutkimuksessa mukana olleet kalankasvattamot. Kalankasvattamot on merkattu symbolilla . Pitoisuudet on esitetty harmaasävyinä. Rantaviiva10-aineisto, lähde: SYKE, MML.

Fuusion avulla saatiin kokonaiskuva  $\alpha$ -klorofyllin alueellisesta vaihtelusta kasvattamoiden välittömässä läheisyydessä ja niitä ympäröivillä vesimuodostumilla (kuva 2). Esimerkiksi Loukeenkariin  $\alpha$ -klorofyllin mittaustuloksia, fuusioituja keskiarvoja sekä niiden luottamusvälejä (kuva 3) tarkastelemalla näemme, kuinka pitoisuus vaihtelee keskimäärin ja että fuusion keskiarvon luottamusväli on pienempi silloin, kun käytettävissä on *in situ* -mittauksia. Tämä johtuu siitä, että niiden virhe on pienempiä kuin satelliittikuviin perustuvissa mittauksissa. Parhaimmillaan fuusion keskiarvon 95 %:n luottamusväli on noin 1  $\mu\text{g/l}$ .

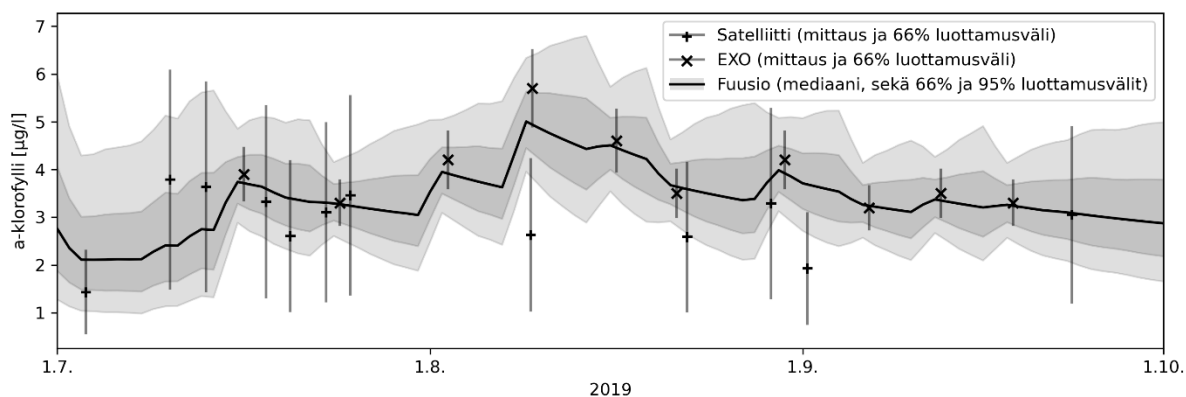


**Kuva 3.** Mitattu ja fuusioitu *a*-klorofyllipitoisuus sekä niiden luottamusvälit 100 m:n etäisyydellä Louheenkarin laitoksesta 1.7.–1.10.2019.

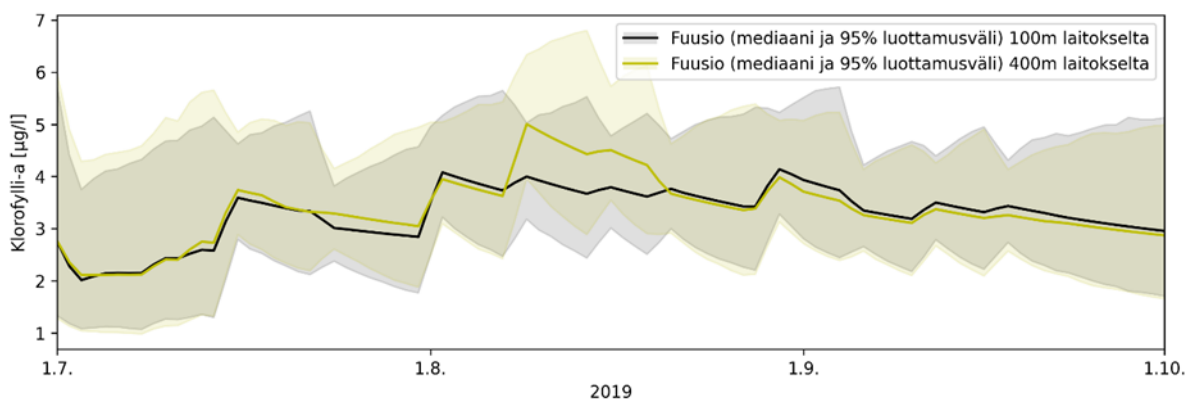
Hupaniityn laitoksen ympärillä (kuva 4) oli 16.7.2019 havaittavissa keskimäärin korkeampia *a*-klorofyllipitoisuuksia. Pitoisuudet vaihtelevat kuitenkin ajallisesti melko paljon. Elokuussa, 400 m:n etäisyydellä, EXO-sondilla mitatut pitoisuudet (korjattu vesinäytteillä) olivat selvästi korkeampia kuin satelliittikuvista tulkitut pitoisuudet (kuva 5). Tällöin fuusioitu pitoisuus 400 m:n etäisyydellä oli korkeampi kuin laitoksella (kuva 6). Epävarmuus oli kuitenkin suurta.



**Kuva 4.** Fuusioitu *a*-klorofylli-pitoisuus (µg/l) 16.7.2019 Ströömässä, Hupaniityn kasvattamon läheisyydessä sekä kasvattamon ja EXO-mittauspisteiden sijainti. Rantaviiva10-aineisto, lähde: SYKE, MML.



**Kuva 5.** Mitattu ja fuusioitu  $a$ -klorofyllipitoisuudet sekä niiden luottamusvälit 400 m etäisyydellä Hupaniityn kasvattamolta 1.7.–1.10.2019.

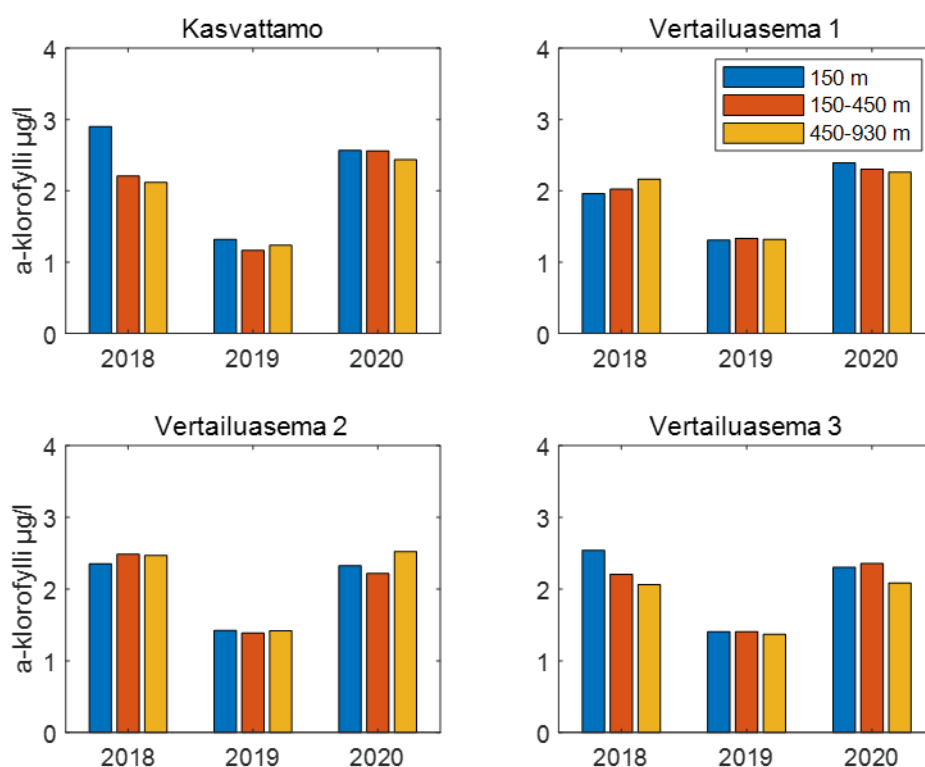


**Kuva 6.** Fuusioidut  $a$ -klorofyllipitoisuudet ja niiden 95 %:n luottamusvälit Hupaniityn kasvattamolla ja 400 m etäisyydellä 1.7.–1.10.2019.

## 4.2. Keskiarvotarkastelut

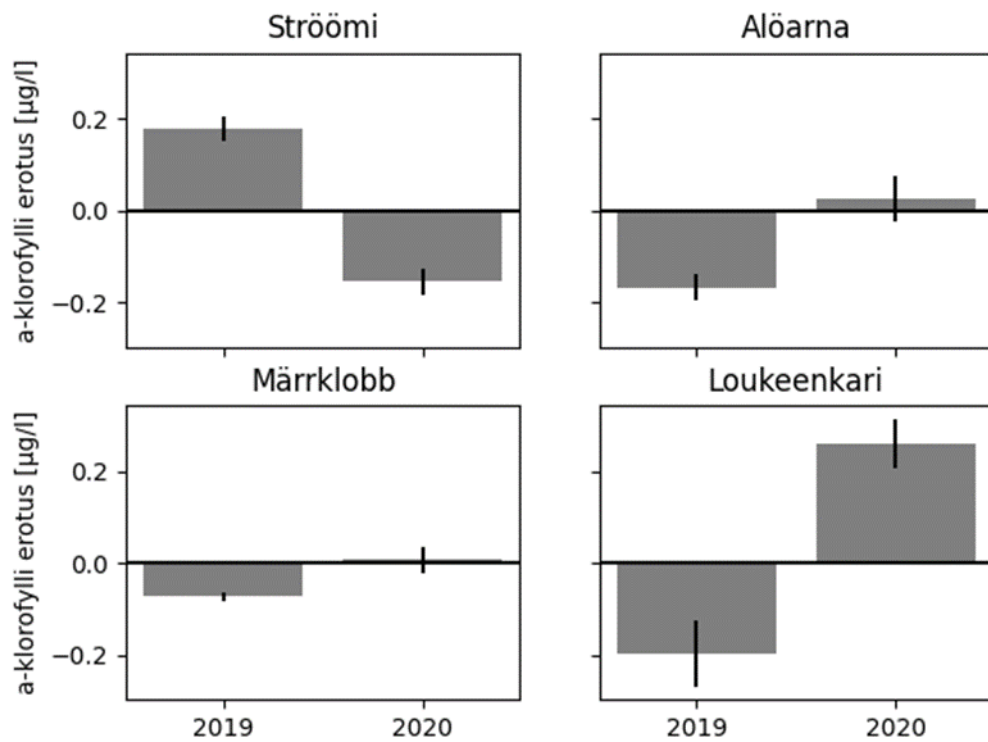
Satelliittituotteiden jatkoanalysointia varten kalankasvatuslaitosten ja vertailupisteiden ympärille muodostettiin 150 m, 450 m, 930 m ja 2000 m säteiset ympyrät sekä näiden erotuksena syntyneet etäisyysvyöhykkeet 150–450, 450–930 ja 930–2000 m. Vertailupisteet valittiin muutamien kilometrin etäisyydeltä kasvattamoista olettaen, että vaikutukset eivät ulotu niihin asti (kuva 1). Laskimme näille tarkastelualueille laitosten ja vertailupisteiden keskimääräiset  $a$ -klorofyllipitoisuudet heinä-syyskuussa vuosina 2019 ja 2020. Kuvassa 7 on esitetty tulokset Märkklobbenin eteläisen kalankasvattamon osalta. Erot eri vyöhykkeiden välillä olivat pienet ja kasvattamon ja vertailupisteiden pitoisuudet poikkesivat toisistaan vuosittain hyvin vähän. Muillakaan kasvattamoilla ei havaittu systemaattisia eroja satelliittikuvatuotteissa eri vyöhykkeiden välillä.





**Kuva 7.** Satelliittikuvista laskettu (C2X prosessori) *a*-klorofyllipitoisuuden vuosittaiset keskiarvot tarkastelualueille 150 m, 150–450 m ja 450–930 m heinä-syyskuussa Märklobbenin eteläisen kalankasvattamon alueella. Tulokset on esitetty kalankasvattamon kohdalla ja kolmella vertailupisteellä vuosille 2018–2020.

Datafuusiotuloksista laskimme laitosten ja vertailupisteiden pitoisuuserojen keskiarvot heinä-syyskuussa 2019 ja 2020 150 m:n etäisyysvyöhykkeille. Vuotuiset keskimääräiset pitoisuuserot laitosten ja vertailupisteiden välillä olivat pieniä ja vaihtelevat jonkin verran (kuva 8). Loukeenkarin laitoksen *a*-klorofyllipitoisuus vuonna 2020 ja Ströömin laitosten vuonna 2019 oli keskimäärin suurempi kuin vertailupisteillä ja vastaavasti pienempi vuosina 2019 ja 2020.



**Kuva 8.** A-klorofyllin keskimääräinen pitoisuusero fuusioidussa tuotteessa kasvattamoiden ja vertailupisteiden välillä 150 m:n etäisyysvyöhykkeellä Ströömässä sekä Alöarnan, Märklobbenin ja Loukeenkariin ympäristössä vuonna 2019 ja 2020. Pystyjana osoittaa keskiarvon 66 % luottamusvälin.

## 5. Yhteenvedo ja johtopäätökset

Saaristomeren kasvattamoiden seuranta havainnollistaa hyvin seurannan nykytilan, haasteet ja niihin liittyvät uudet mahdollisuudet. Alueen ekologista tilaa seurataan satelliittien, vesinäytteiden ja mittausanturien avulla. Satelliitit tuottavat alueellisesti kattavia, hetkellisiä havaintoja vesialueen pintakerroksen  $a$ -klorofylli-pitoisuudesta. Kuvaushetkellä aluetta peittävät pilvet rajoittavat kuitenkin havainnointia. Vesinäytteillä puolestaan saadaan  $a$ -klorofyllipitoisuus määritettyä tarkasti yhdessä pisteessä ja voidaan mitata vertikaalijakaumaa, mutta ajallinen ja alueellinen edustavuus on yleensä huono. Tähän asti näistä tietolähteistä saatavat havainnot on keskiarvoistettu ottamatta huomioon havaintojen edustavuutta ja tarkkuutta. Toistaiseksi on puuttunut siihen tarvittava laskennallinen välineistö ja yhteisesti sovittu toimintamalli.

Tässä raportissa havainnollistimme, kuinka tietolähteiden yhdistäminen (datafuusio) voidaan toteuttaa laskennallisesti ottaen huomioon havaintojen tila-aika-skaala, tarkkuus ja edustavuus. Demonstroimme saavutettavissa olevat hyödyt ja kehityskohteet merialueen seurannan todellisessa mittakaavassa ja toimintaympäristössä. Kun yhdistetyn tila-arvion ( $a$ -klorofylli) tarkkuus on arvioitu, voidaan ympäristölupien lupaehtoihin pääsemiseen liittyvät epävarmuudet ja riskit arvioida realistisesti.

Saimme aikaisempaa kattavamman ja tarkemman kuvan  $a$ -klorofyllin vaihtelusta kasvattamoiden ympärillä fuusioimalla satelliittikuvatulkintoja, velvoitetarkkailun tuloksia ja anturimittauksia. Erot valittujen kasvattamoiden ja vertailupisteiden  $a$ -klorofyllipitoisuuksissa olivat hyvin pieniä ja yleensä arviointitarkkuuden alapuolella. Joinakin vuosina Loukeenkarin ja Hupaniityn kasvattamolla havaittiin keskimäärin vertailupisteitä hieman korkeampia ja myös pienempiä pitoisuuksia. Nämäkin erot olivat hyvin pieniä.

*In situ* -mittauksia laitosten ympäristössä tulee edelleen tarkentaa. Poijudatan kunnollinen hyödyntäminen edellyttää mm. riittävää sensorien puhdistamista ja riittävää vertailunäytteiden määrää luotettavan mittausdatan saamisen varmistamiseksi. Poijuja olisi hyvä olla tutkimuskäytössä kaksi tai kolme kappaletta huolella valituissa paikoissa (päävirtaussuunnat) kasvattamoiden lähistöllä. Yksi poijuista olisi vertailupisteessä, johon kalankasvattamo ei vaikuta. Vuonna 2020 Luke ja Syke tekivät lisää EXO-mittauskampanjoita laitosten ympäristössä alueellisen  $a$ -klorofylli- ja sameusvaihtelun selvittämiseksi (Niukkanen & Kankainen 2021, Tuominen 2021). Lisäksi käytössä oli parannettu versio meriolosuhteisiin suunnitellusta mittauspoijusta.

Kattavampia ja laadukkaita *in situ* -mittauksia (mm. EXO, poiju) voidaan käyttää sellaisenaan tilastollisiin analyysihin (taulukko 1) ja ne myös parantavat datafuusiotuloksen luotettavuutta. Datafuusiossa arvion epävarmuus on sitä suurempi, mitä pidempi on mittausten välinen etäisyys ja aika. Tämän vuoksi mittauksia tulisi tehdä aikaisempaa tiheämmin. Data-assimilaatiossa mittauksista johtuvaa epävarmuutta voidaan jossain määrin pienentää simuloimalla  $a$ -klorofyllipitoisuus mittausten välillä virtaus- ja vedenlaatumallilla, ja päivittämällä malli mittauksilla silloin, kun havaintoja on saatavilla.

Suomessa data-assimilaatiota on kokeiltu mm. Säkylän Pyhäjärven veden laadun mallinnuksessa (Mano ym. 2015). Rannikkoalueella data-assimilaatio voisi perustua rannikkomalleihin, jotka kattavat lähes koko rannikkoalueen (Lignel 2018). Jatkossa, kalankasvatuksen vaikutusarvioita voitaisiin edelleen tarkentaa assimilaatio-menetelmiä kehittämällä ja soveltamalla. Olemassa olevien assimilaatiotekniikoiden soveltaminen rannikkoaluemallinnukseen on teknisesti mahdollista, mutta edellyttää merkittävää satsausta tekniseen sovellustyyöhön ja menetelmän pilotointiin.

Jotta mahdolliset vähäiset vaikutukset saadaan avomerelläkin havaittua, datafuusiota tulee edelleen kehittää ja yhdistää virtaus-vedenlaatumalleihin assimilaatio-tekniikalla. Merkittäviä parannuksia saadaan myös anturimittausten ja satelliittitulkintojen tarkkuutta parantamalla.

## Viitteet

- Kauranne, T., Gunia, M., Kallio, K., Malve, O., Kettunen, J., Laine, M. & Haario, H. 2019. Ensemble Kalman smoothing of algal bloom events. Data Assimilation, Predictability, Errors and Uncertainty Quantification in Geosciences. EGU General Assembly 2019: 7.4.2019 Austria.
- Kettunen, J., Lignell, R., Ropponen, J., Malve, O. & Kotamäki, N. 2015. Kalankasvatuksen ympäristöseurantajärjestelmän kehittäminen. 19 s. <https://www.kalankasvatus.fi/wp-content/uploads/2018/01/Kalankasvatuksen-ymparistoseurantajarjestelman-kehittamisen-Loppuraportti.pdf>.
- Koponen, S. & Attila, J. 2017. Sentinel-satelliitit mullistavat vesiseurannan. Vesitalous 2/2017.
- Kotamäki, N., Malve, O., Kankainen, M., Käppi, T. & Nygård, H. 2021. Ahvenanmaan kalankasvatuslaitosten vaikutukset päälyslävästöön ja pohjaeläimistöön. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 40/2021. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 85 s.
- Laine, M., Haario, H., Kettunen, J. & Malve, O. 2017. Havaintojen yhdistämisellä tehoa vedenlaatuaseurantaan. Vesitalous 2/2017.
- Lignell, R. 2018. Rannikon (Suomenlahti, Saaristomeri, Selkämeri) kokonaiskuormitusmalli: ravinnepäästöjen vaikutus veden tilaan - kehityshankkeen loppuraportti. <https://www.syke.fi/download/noname/%7BCB9A5FC1-8CD8-4F81-B3DE-1604A772AE7A%7D/149144>.
- Liljaniemi, P. & Kettunen, J. 2019. Ympäristötieto tänään, huomenna, Vesitalous 4/2019.
- Malve, O., Kotamäki, N., Laine, M. & Weigel, B. 2018. Hierarchical Modelling and Spatiotemporal Interpolation for Monitoring and Management of Lakes. SIL, 34 General Assembly, Nanjing, China.
- Malve, O., Kallio, K., Siivola, E., Kervinen, M., Kankainen, M. & Keto, V. 2021. Kalankasvattamoiden vedenlaatuvaikutusten seuranta datafuusion avulla. Vesitalous 3/2021.
- Mano, A., Malve, O., Koponen, S., Kallio, K., Taskinen, T., Ropponen, J., Juntunen, J. & Liukko, N. 2015. Assimilation of satellite data to 3D hydrodynamic model of Lake Säkylän Pyhäjärvi. Water Sci Technol 1 April 2015; 71 (7): 1033–1039. doi: <https://doi.org/10.2166/wst.2015.042>.
- Niukko, J. & Kankainen M. 2021. Vedenlaadun mittauksia kalankasvatuslaitoksilla : Havaintoja automaattisista mittareista Saaristomerellä 2019–2020. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 41/2021. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 39 s.
- Paloniitty, T., Kettunen, J. & Malve, O. 2017. Ympäristötiedon tuotanto uudistuu – muuttuvatko luvitus ja valvonta? Vesitalous 2/2017.
- Suominen, T. & Helminen, H. 2003. Kustavin kalankasvatuksen sijainninohjausmalli. Lounais-Suomen ympäristökeskus 12/2003.
- Suominen, T., Ropponen, J., Kankainen, M., & Malve, O. 2021. Kalankasvatuksen ympäristövaikutusten suuntautuminen luvituksen kannalta keskeisille alueille. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus, painossa. Luonnonvarakeskus. Helsinki.

- Tuominen A-M. 2021. Kalankasvatuksen paikalliset vaikutukset. Mittaukset Saaristomerellä 2020. Opinnäytetyö (AMK), Energia- ja ympäristötekniikka, Turun ammattikorkeakoulu. <https://www.theseus.fi/handle/10024/356158>.
- Turkki, J. 2019. Loukeenkarin kalankasvatuksen tarkkailututkimus. Vuosiraportti 2018. Lounais-Suomen vesi- ja ympäristötutkimus Oy. Nro 476-19-7843. 45 s.
- Turkki, J. 2020. Kustavin ja Iniön merialueen kalankasvatuslaitosten velvoitetarkkailututkimusten pitkäaikaisraportti 2013-2018. Lounais-Suomen vesi- ja ympäristötutkimus Oy. Nro 152-20-123. 99 s.
- Valtioneuvosto 2014. Valtioneuvoston periaatepäätös 4.12.2014; Vesiviljelystrategia 2022. 16 s.





luke.fi

Luonnonvarakeskus  
Latokartanonkaari 9  
00790 Helsinki  
puh. 029 532 6000